

付録 2

平成 25 年度卒業研究発表会要旨

(原子力研究所配属学部学生および大学院生)

近畿大学原子力研究所には、電気電子工学科および生命科学科より十数名の卒業研究生、ならびに総合理工学研究所より数名の課程大学院生が例年配属されます。原子力研究所関係教員の指導のもとに学部、大学院教育、研究が行われ、その成果を口頭発表し、卒業論文、修士論文、博士論文としてまとめております。これらの内容は、近大原研の教育研究活動を知って頂く上で良い資料になると考え、ここに発表会の要旨を付録として掲載します。

卒 業 論 文

1. 電気電子工学科

Nizamuddin Bin Jasman	モンテカルロ法による近畿大学原子炉の中性子束分布解析
藤本 敦士	加速器駆動未臨界炉におけるプルトニウム燃料の燃焼特性
石井 俊晃	多群拡散理論を用いた高速増殖炉の高次モード解析
西尾 拓	亜臨界水による難燃物の油分転化 ―反応容器内部温度 370[℃]設定―
山下 泰弘	異なる位置読み取り電極を有する熱中性子検出器の位置分解能
樋上 哲郎	抵抗シートを用いた熱中性子位置検出器の開発
崎山 貴史	実習ライブラリーの整備
阪中 翔太	^{223}Ra 放射性薬剤の汚染管理に関する研究
山口 祥英	さつまいもとパセリによる土壌中放射性セシウムの吸収
野平 陽巳	近畿大学原子炉上蓋内照射孔における中性子束の測定

2. 生命科学科

帖地 剛史	X線が細胞分化に及ぼす影響を評価するための基礎研究 ―ヒト iPS 細胞を用いて―
吉村 忠	キノコへの放射性セシウムの移行
吉田 太輔	農作物の栄養吸収における K と Cs の拮抗
切東 良介	原爆放射線疫学データの対照群による低線量影響の再考

モンテカルロ法による近畿大学原子炉の中性子束分布解析

12-1-036-0805 NIZAMUDDIN BIN JASMAN

(原子力研究所第一研究室)

1. 背景と目的

現在、核不拡散の観点からアメリカ主導で世界中の高濃縮ウラン使用している研究試験炉燃料の濃縮度を低減化する計画 (RERTR) が進められており、我々が近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) もその対象である。熱出力 1W の UTR-KINKI においても、低濃縮化等の炉心変更を実施する際には、事前に十分な予測計算を実施する必要がある。しかし、軽水減速黒鉛反射二分割炉という特殊性に加えて、低出力故に燃焼が極めて少ない UTR-KINKI では、シミュレーション解析の実績が極めて少ない。そこで本研究では連続エネルギー中性子輸送モンテカルロコード「MVP2.0」を用いて UTR-KINKI のシミュレーション計算を実施し、中性子束分布の再現を行うことを目的とする

2. 解析体系

図 1 に構築した UTR-KINKI の幾何形状モデルを示す。

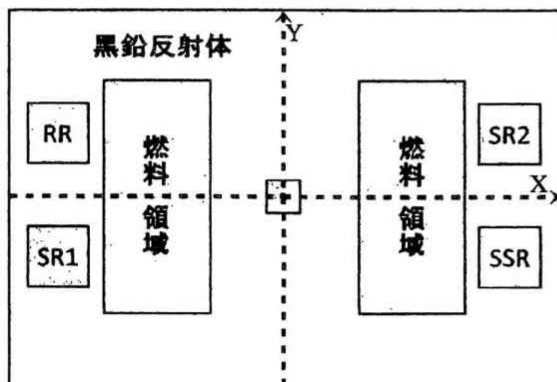


図 1 : UTR-KINKI の幾何形状モデル

UTR-KINKI は図 1 に示すように黒鉛反射体中に 2 つの燃料領域を有する 2 分割炉である。それぞれの燃料領域には燃料要素を 6 体ずつ収めたアルミ製のタンクが設置されており、タンク内は減速材の軽水で満たされている。炉心中央には照射サンプル等を挿入する為の中央ストリンガー孔が存在する。また、

UTR-KINKI には 2 本の安全棒 (SR1, SR2) とシム安全棒 (SSR)、調整棒 (RR)、合計 4 本の制御棒が設置されている。以上の仕様を反映し、黒鉛反射体の中心点を原点とした 3 次元解析モデルを作成した。なお解析に使用した評価済み核データライブラリは「JENDL-4.0」である。

3. 解析結果と結論

解析の結果得られた X 軸上の中性子束分布を図 2 に示す。なお、図中では 1eV 以下のエネルギーを持つ中性子を熱中性子とし、それより高いエネルギーを持つ中性子を高速中性子として示している。

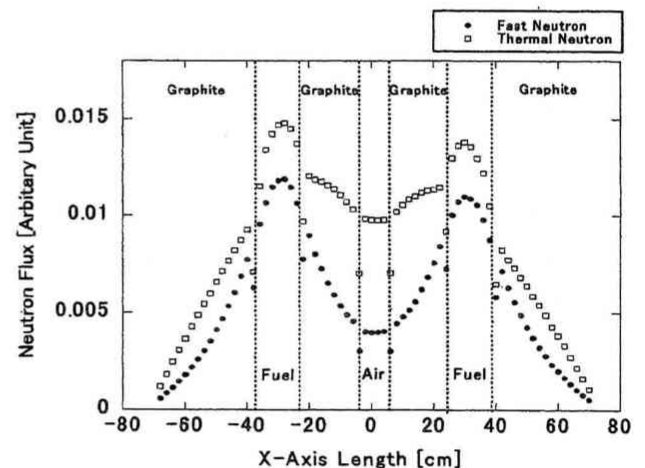


図 2 : 中性子束分布の計算結果

得られた中性子束分布は燃料領域にピークを有する二つ山形状を示した。燃料領域では熱中性子と高速中性子は類似した中性子束分布を示しているが、反射体領域では異なる減衰の様子を示した。これは黒鉛反射体の減速効果により高速中性子が熱化するからである。その結果として、中央ストリンガー孔内における中性子束は熱中性子が支配的である。

4. まとめ

MVP2.0 を用いて UTR-KINKI のシミュレーション解析を実施した。解析により得られた中性子束分布は UTR-KINKI の特徴をよく再現した。

加速器駆動未臨界炉におけるプルトニウム燃料の燃焼特性

10-1-036-0206 藤本 敦士

(原子力研究所第一研究室)

1. 背景と目的

我が国の原子力開発計画では、当初、軽水炉使用済み燃料の再処理から抽出されるプルトニウムは高速増殖炉で専ら燃焼させる予定であった。しかし、高速増殖炉開発の大幅な遅れと軽水炉での燃焼(プルサーマル)の停滞のため、我が国のプルトニウム保有量が急速に増大し、諸外国に核不拡散上の懸念を抱かせている。余剰プルトニウム保有量を削減することは、我が国にとって非常に重要な課題である。

本研究では、安全性と燃焼効率の高い加速器駆動未臨界炉(ADS)においてプルトニウムを燃焼させることを想定し、この燃焼特性を解析により明らかにし、燃焼量向上のための検討も行った。燃焼解析には、日本原子力研究開発機構で開発された次世代炉心解析システム MARBLE を使用した。

2. ADS 体系及び解析手法

解析に用いた ADS の体系を図 1 に示す。上図は 1/4 炉心の上面図、下図は半径方向の等価断面図を示す。計算は下図のように炉心を RZ 体系として行った。炉心領域に U-Pu 混合酸化物(MOX)燃料及び希釈材として MgO を装荷した。プルトニウム富化度及び燃料ピンの直径、コアの高さ、半径方向長さを表 1 の様に設定し、燃焼特性のこれらパラメータに対する依存性を調べた。

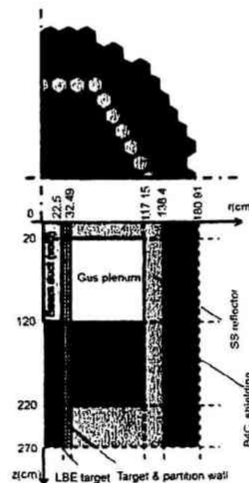


図 1 ADS 体系図 1)

表 1 変更パラメータ

プルトニウム富化度[wt%]		
13.1、14.6、17.4(※)、20.3、23.1、26.0、28.8、31.6、34.4、39.9、45.4、50.9、56.3		
ピン直径[cm]	コア高さ[cm]	コア半径方向長さ[cm]
0.60	70	60
0.65(※)	100(※)	84.66(※)
0.80	130	100
0.90	160	120

※デフォルト設定

3. 結果と考察

MOX 燃料の富化度と 600 日当たりのプルトニウム燃焼量の関係を図 2 に示す。装荷燃料の富化度を大きく設定すると燃焼量が増大している。これは U-238 の中性子捕獲による新たな Pu-239 の生成量が減少することに起因している。図 3 に実効増倍率の富化度依存性を示す。初期富化度を大きく設定すると実効増倍率低下がより急峻になることがわかる。これは U-238 の中性子捕獲に起因する新たな Pu-239 の生成量が減少することにより、炉内の Pu-239 減少速度が大きくなることに因る。

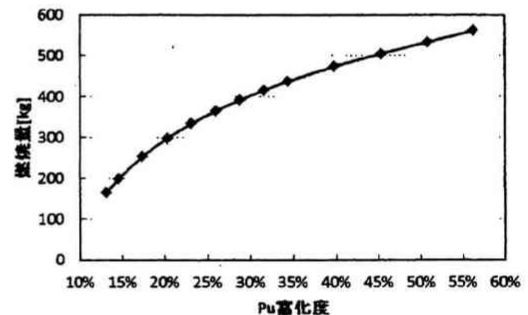


図 2 プルトニウム燃焼量の富化度依存性

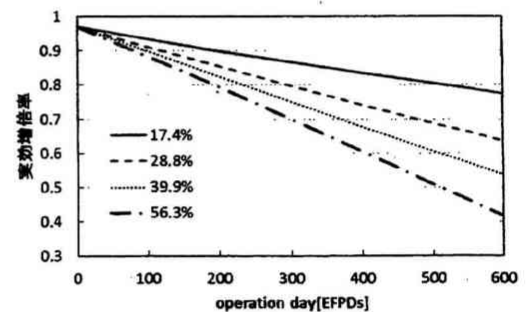


図 3 富化度変化時の実効増倍率変化

4. まとめ

次世代炉心解析システム MARBLE を利用し、ADS を用いてプルトニウムを燃焼させた場合の燃焼特性を解析した。プルトニウム燃焼量及び反応度変化を評価することができた。

参考文献

- (1) K. Nishihara et al, Nucl. Sci. Technol., Vol. 45, No. 8, p. 813 (2008)

多群拡散理論を用いた高速増殖炉の高次モード解析

10-1-036-0057 石井 俊晃

(原子力研究所第一研究室)

1. 背景と目的

原子炉の出力分布安定性の観点から、外乱に対する中性子束分布の変動感度は小さいことが要求される。そこで、空間高次モードにおける固有値間隔の計算を行うことで、外乱に対する、中性子束分布の変動性を求める。富塚らの研究¹⁾では、単一の中性子エネルギーを仮定する1群モデルを採用し、高速増殖炉「もんじゅ」に対して高次モード固有値解析を行い、変動感度の評価指標である固有値間隔を求めた。しかし、実際の原子炉内の中性子エネルギー分布は10桁にも及ぶ²⁾。従って、固有値間隔の計算においても中性子エネルギー分布を考慮し影響を評価する必要がある。本研究では、2次元六角座標系においてエネルギー6群モデルを採用し、固有値問題を解くことで得られる固有値間隔を、1群モデルによる結果と比較、検討する。

2. 計算方法

固有値計算にはベキ乗法を用いた。本研究では、以下に示す二重の反復計算により固有値 $\lambda^{(k)}$ 及び固有関数 $\varphi^{(k)}$ を得る。

$$L_g \varphi_g^{(k)} = \frac{1}{\lambda^{(k-1)}} M_g \varphi_{g'}^{(k-1)} \quad (1)$$

$$\lambda^{(k)} = \lambda^{(k-1)} \frac{\langle M_g \varphi_g^{(k)} \rangle}{\langle M_g \varphi_{g'}^{(k-1)} \rangle} \quad (2)$$

$$g=1,2,3\cdots 6. \quad k=1,2,3\cdots$$

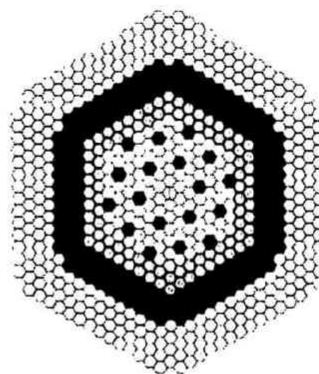
() : 空間とエネルギーの積分

L_g は吸収、漏れによる中性子消滅演算子、 M_g は核分裂による生成演算子、 g は群乗数、 k は繰り返し計算回数である。高次モード計算の時はベキ乗法にホテリング法を用いることで、既に求めた基本モードから第 n 次モードまでの成分を反復ベクトルから除去し、第 $(n+1)$ 次モードを求めた。

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_0} \quad (3)$$

固有値間隔 ε_n は、(3)式に示すように、得られた第 n 次固有値 λ_n と基本固有値 λ_0 の逆数の差として定義される。計算は図1に示すもんじゅの2次元六角座標モデルについて、全引抜、全挿入、センター挿入体

系を含む計7つの制御棒パターンについて固有値と固有関数の解析を実施した。



炉心構成要素		記号
炉心燃料	内部炉心	○
集合体	外部炉心	○
制御棒	センター	⊕
集合体	制御棒	●
ブランケット燃料集合体		●
中性子遮蔽体		○

図1 「もんじゅ」炉心体系

3. 結果および考察

解析により得られた各制御棒挿入体系における1次モードから5次モードの固有値間隔を表1に示す。得られた固有値間隔は全挿入体系を除き、6群モデルの結果は1群モデルに比べて、固有値間隔が小さくなった。全挿入体系では3次モードを除き、6群モデルの結果が1群モデルに比べ、大きな固有値間隔を得た。ただし、6群モデルと1群モデルの固有値間隔の差は2%程度と小さい。

表1 1群と6群における固有値間隔

モード	全引抜		全挿入		センター挿入	
	1群	6群	1群	6群	1群	6群
1次	13.38	13.16	8.30	8.93	12.37	12.12
2次	13.38	13.16	8.30	8.93	12.28	12.12
3次	33.14	32.70	18.44	18.10	32.13	31.66
4次	33.14	32.70	24.07	25.27	32.13	31.66
5次	46.18	44.76	42.41	44.07	49.11	47.55

以上の結果から高速炉体系においては1群モデル6群モデルにおける固有値間隔の差は小さい。これは熱中性子炉に比べて高速炉では、炉内中性子の大多数を高速中性子(1keV以上)占めるからである。

参考文献

- 1) 富塚慎吾, “高次モード計算に対する Wielandt 源反復加速法の適用”, 近畿大学大学院、修士論文、平成22年度, F9,
- 2) 平川 直弘, 岩崎 智彦, “原子炉物理入門”, 笹氣出版印刷株式会社, F222,

亜臨界水による難燃物の油分転化

－反応容器内部温度 370[°C]設定－

10-1-036-0184 西尾 弘

(原子力研究所第一研究室)

1. 背景・目的

原子力発電所を日々運営するためには難燃性廃棄物の発生は不可避である。現在この処理方法は、圧縮などを施した後、最終的に 200L ドラム缶に密封し埋設処分している。しかし、この方法では埋設地に限界があり、減容処理方法を新たに開発する必要がある。

本研究では、難燃性廃棄物として、ゴム手袋及び塩化ビニルテープを用い、これらを亜臨界水により油分転化し、減容効果の評価を実施した。

2. 原理

亜臨界水とは、水の臨界点(温度：約 374[°C]、圧力：約 22[MPa]) より少し低い温度と圧力を有する流体であり、有機物に対し高い分解力を示す。

本研究の予備実験の結果、反応容器内部に水 8 [cm³]を封入し内部温度 370[°C]とした場合、内部圧力は 20 [MPa]であった。この条件において、水は亜臨界状態にある。上述の条件の亜臨界水により本研究を実施した。

3. 実験方法

本研究の難燃性廃棄物（以下「難燃物」とする。）として、ゴム手袋及び塩化ビニルテープを用いた。容器内部に水と難燃物を封入した。内部温度 370[°C]を 5[min]あるいは 30[min]を保持した。放冷後、内部温度が室温となってから開封し、内容物を水並びクロロホルムで回収した。反応前後の難燃物の質量差から油分転化率を算出した。

4. 結果および考察

ゴム手袋は亜臨界水によって油分となり分解した。油分転化率は 70[%]から 80[%]であった。表 1 にゴム手袋の油分転化率を示す。

一方、塩化ビニルテープの油分転化率は 3[%]前後

であった。表 2 に塩化ビニルテープの油分転化率を示す。また、塩化ビニルテープ処理後の水相は薄い水色であった。液性は pH 試験紙の結果から酸性であった。硝酸銀水溶液を添加した結果、白色沈殿を確認した。白色沈殿は塩化銀であると考えられる。以上のことから、水相には塩化ビニルテープ由来の塩化物イオンが存在していると考察した。さらに ICP 発光分析の結果、反応容器（ハステロイ C-276 製）の主成分に由来する Ni²⁺を確認した。

表 1：ゴム手袋の油分転化率

保持時間 [min]	油分転化率[%]			
	質量[mg]			
	200	300	400	500
5	77.3	78.4	78.9	81.2
30	67.6	76.2	76.4	80.2

表 2：塩化ビニルテープの油分転化率

保持時間 [min]	油分転化率[%]			
	質量[mg]			
	200	300	400	500
5	3.4	3.2	3.6	3.2
30	2.6	2.7	2.6	2.1

5. まとめ

ゴム手袋、塩化ビニルテープ共に保持時間 5[min]に対し 30[min]とした場合は油分転化率が低下した。これは、保持時間が長くなるほど油分が気体になるまで分解したと考察した。

一方、ゴム手袋に比べ塩化ビニルテープの油分転化率が低いことから、塩化物イオンが発生すると難燃物の分解が妨げられると考察した。

6. 参考文献

- [1] 化学工学会超臨界流体部会：超臨界流体入門，丸善株式会社，2006 年。
- [2] 佐古 猛：超臨界流体，株式会社アグネ承風社，2001 年。

異なる位置読み取り電極を有する熱中性子検出器 の位置分解能

10-1-036-0010 山下 泰弘
(原子力研究所 第2研究室)

1. はじめに

我々は、傾斜線式、バックギャモン式、抵抗シート式のそれぞれの位置読み取り法を用いた極めて簡単な構造の熱中性子用位置感応型比例計数管を開発し、近畿大学の原子炉 (UTR-KINKI、最大熱出力 1 W) を用いて性能調査実験を行っている。

本研究の目的は、これらの異なる位置読み取り電極を有する検出器の位置分解性能を調査することである。特に初めて使用する抵抗シートの実用性に関心がある。

2. 実験

検出器は外寸 100 mm×300 mm×50 mm の直方体形で、厚さ 1 mm のアルミ製とした。また、直径 2 mm のスリット孔を 10 mm 間隔で 19 個あけた 50 mm×200 mm のアルミ板を設置し、そこに焼結窒化ホウ素板を並べ、中性子を $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により荷電粒子に変換させ、荷電粒子を内部に入射させる。検出器の中心には金メッキが施された直径 50 μm のタングステン線が陽極芯線として張ってある。

傾斜線式では、陽極芯線を挟むように直径 340 μm の 2 本のステンレス線が平行に $\tan \theta = 1/34$ の角度で張られていて、それらからの信号をそれぞれ A、B、陽極芯線からの信号を C として測定した。

バックギャモン式では、90 mm×200 mm のプリント基板を 16 個の直角三角形に分割し、両端からの信号をそれぞれ A、B、陽極芯線からの信号を C として測定した。

抵抗シート式では、静電シート (材質: 導電体である炭素を含むポリエチレン、厚さ: 約 0.1 mm、抵抗値: 300 k Ω) を 8 mm×180 mm に加工し、陽極芯線の下部 10 mm の位置に取り付け、両端からの信号をそれぞれ A、B、陽極芯線からの信号を C として測定した。

原子炉の出力は 1 W で、測定は List Mode を用いて A、B、C のそれぞれの信号を同時測定した。そして、熱中性子の入射位置 P は $A/(A+B)$ により算定した。

3. 解析結果及び考察

List Data 解析を行い、P vs. C の 2 次元平面に設けた多角形窓 (GB-D2PC) によりイベントを選別して得た位置スペクトルを図 1 に示す。

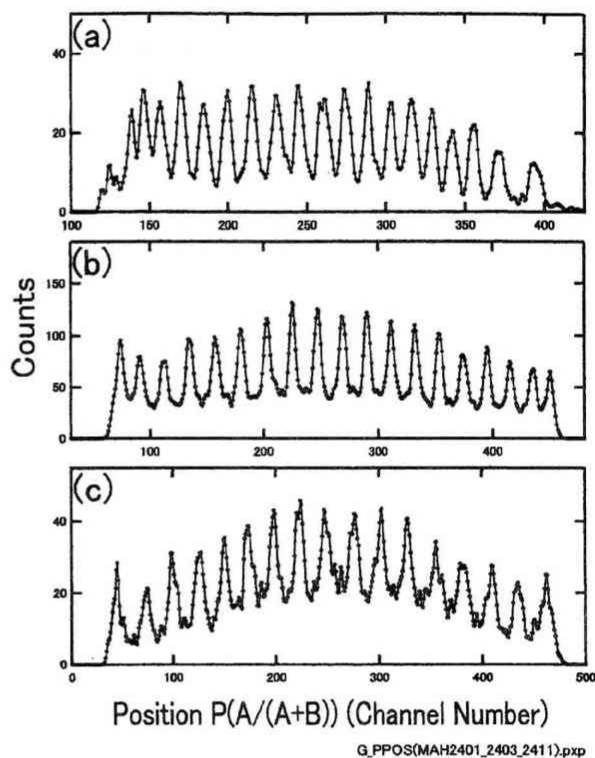


図 1 位置スペクトルの比較。(a) 傾斜線式、
(b) バックギャモン式、(c) 抵抗シート式。

各方式における中央部分の 3 本のピークの半値幅の平均値から位置分解能を評価した。その結果、抵抗シート式、傾斜線式、バックギャモン式の順で位置分解能は良くなり、概略 4 mm~6 mm であった。

本研究では、今回初めて使用する抵抗シートの実用性に強い関心があるが、極めて単純な構造にも関わらず、目的によっては位置検出器として十分に機能することがわかった。

抵抗シートを用いた熱中性子位置検出器の開発

10-1-036-0151 樋上 哲郎

(原子力研究所 第2研究室)

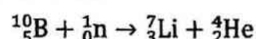
1. はじめに

我々は近畿大学原子炉 (UTR-KINKI、最大熱出力 1W) を使い、熱中性子の位置検出器の開発を行っている。位置読み取り電極として、抵抗シート、傾斜線、バックギャモンパターンを使用している。

本研究の目的は主として抵抗シートを用いた位置検出器の基礎性能を調べ、その特徴を理解することである。

2. 実験原理

中性子は電離を起こさないため、測定するためには荷電粒子に変換する必要がある。検出器上部に設置した焼結窒化ボロン板に熱中性子を入射させ、以下の反応を起こさせる。



PR ガスを検出器内に充填させ、発生したリチウム7あるいは α 線によりPR ガスを電離させる。このとき発生した電子は電界によりドリフトし、陽極芯線に引き寄せられ、電子なだれ (小さな放電) を発生させる。これにより静電誘導が発生し、陽極芯線下部に設置してある抵抗シート上に静電誘導電荷が発生する。電子なだれが発生した位置によって、電荷が抵抗シート両端に流れる際に受ける抵抗の値が異なるため、位置を検出することが出来る。

3. 実験装置

使用した検出器は矩形型と円筒型の検出器の2種類である。矩形型位置検出器は50 mm×200 mmのアルミ板に幅8 mm、長さ180 mm、抵抗値300 k Ω の抵抗シートを陽極芯線から10 mmの位置に設置した。この内部構造を図1に示す。

円筒型検出器は外径25 mm、内径19 mm、長さ200 mmのアルミ円筒内に矩形型と同様の抵抗シートを陽極芯線から6 mmの位置に設置した。どちらも上部にボロン板用スリット孔 (直径2 mm) を10 mm 間隔で19 個あけ、その上にボロンの板を配置した。

抵抗シートは静電シートとして使用されていた炭素を練りこんだ厚さ0.1 mmのポリエチレンを用い、シート状に加工したものである。

4. 解析結果と考察

発生した静電誘導は抵抗シート両端及び陽極芯線から信号A, B, Cとして測定される。3つの信号を一つのEventとしてListmodeで記録し、解析ソフトIGORで解析を行った。その結果、円筒型抵抗シートの位置分解能 (半値幅) は、矩形型よりも優れていて、傾斜線型と同等 (4 mm 以下) であることがわかった。極簡単な電極構造である抵抗シート利用が有望であると考えられる。

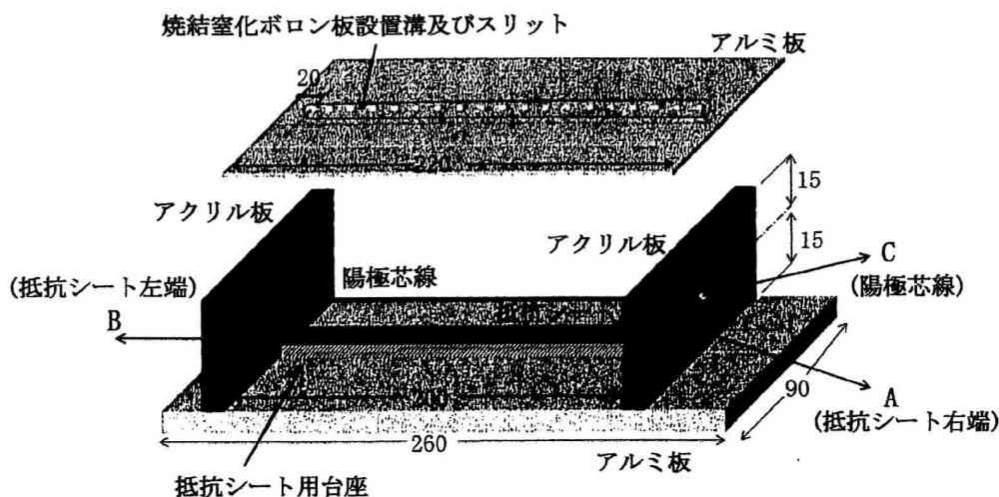


図1 抵抗シートを用いた矩形型位置検出器

近畿大学原子炉実験データを用いた

実習ライブラリーの整備

10-1-036-0163 崎山 貴史

(原子力研究所 第2研究室)

1.はじめに

近畿大学原子炉は、他大学の学生実習にも利用されている。しかし原子炉のマシントイムや施設の制約から原子炉に受け入れることができる日程、人数に限られる。そこで昨年度は、原子炉のマシントイムの制約を解消し、系統的な原子力教育を実施するため、事前に実験課題に沿って原子炉を運転してデータを収集し、実験テーマごとに事前学習、レポート課題等を含めた実習ライブラリーの作成を行った。そのライブラリーは今年度、東海大学原子力工学科において、近畿大学原子炉実習を受講する学生に対しての事前講義の教材として使用された。そこで、実際に使用するにあたって、ライブラリーに収録されているビデオの上映時間と講義時間の関係等問題点が存在した。また、実習終了後、データ整理の手助けとなるような利用しやすいデジタルデータ及びデータシートを提供して貰いたいという要望があった。そこで本研究では、これらの問題点を解決し、より使い易いライブラリーの作成をした。

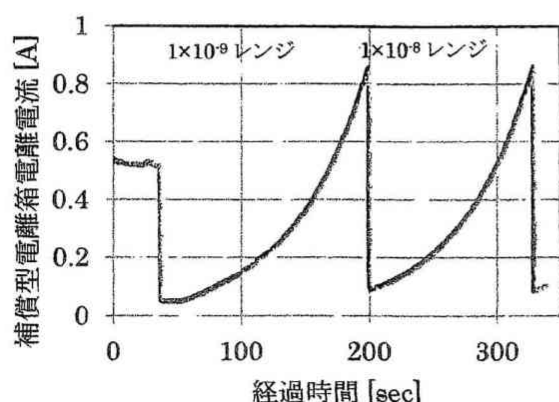


図1. ペリオド法による制御棒校正実験
シム安全棒位置 76% → 100% の
補償型電離箱線形出力計の指示値

2.データ収集の方法

原子炉出力、制御棒位置等の原子炉運転データをナショナルインスツルメンツ社製の A-D コンバータを利用してパソコンに収集し、ビデオカメラで原子炉の運転状況等を撮影したデータを統合し、実習ライブラリーを作成した。本研究では、臨界近接実験及び正ペリオド法の実習ライブラリーデータ整備を行なった。正ペリオド法の解析に用いた原子炉出力データの一例を図1に示す。

3.ライブラリーデータの整備

実際の近畿大学原子炉を使用した実習で多くの大学が行っている実習課題に、原子炉の制御や核的安全性などについて理解するために重要な制御棒校正実験がある。昨年度のライブラリーでは、実際に測定に関与してもらう観点から、原子炉の出力系の値のビデオデータを読み取ることに重点をおいていたが、本年度は、実習後のデータ整理の観点から、原子炉から収集したデジタルデータを整備した。また、時間的制約からほとんどの大学の学生実習で実施されていない臨界近接実験のビデオデータを整備した。

4.まとめ

制御棒校正実験、臨界近接実験のライブラリーを整備した。来年度は原子炉施設の新規制基準対応の為、原子炉実習を実施することが困難であることから、このライブラリーは、来年度も東海大学で実際に使用する予定である。そこでアンケート調査を実施してより理解ができるようなライブラリーを作成する予定である。

^{223}Ra 放射性薬剤の汚染管理に関する研究

10-1-036-0167 阪中翔太

(原子炉研究所 第2研究室)

1. はじめに

1970年代以降、日本ではがん患者が増えてきており、現在では日本人の死因の約3分の1はがんである[1]。がんの治療法には、外科療法、化学療法等があるが、近年放射線による診断・治療技術の進歩が目覚ましい。特に、壊変系列を組む α 線放出核種を用いた放射線核種治療(RNT)はその高い薬効から、世界中で注目を集めている。アクチニウム系列核種 ^{223}Ra 薬剤を用いた骨腫瘍疼痛治療への臨床試験が日本でも開始されたが、 ^{223}Ra 薬剤の薬効調査はなされている一方で汚染管理に対する知見がほとんど蓄積されていない。本研究は ^{223}Ra 薬剤の汚染管理に係る知見の蓄積を目的とする。

2. 実験目的

本実験は、病院の臨床現場で一般的に使用されているサーベイメータ(GMサーベイメータ及び、 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ)の ^{223}Ra 薬剤汚染に対する応答を調査することを目的とする。

3. 実験方法

まず、 ^{223}Ra 薬剤をカラーシート中央に滴下、乾燥させ模擬試料とした。図1の様に模擬汚染試料を単軸ロボット(ヤマハ発動機株式会社製 T512-600)により移動させながら広口 GMサーベイメータ(日立アロカメディカ社製 TGS-133)

及び NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ(日立アロカメディカル社製 TCS-161)による測定を行った。模擬試料の速度は、8mm/s、16mm/s、24mm/s、32mm/s、40mm/s、80mm/s、240mm/s、800mm/sで試料を移動させながら測定を行った。サーベイメータを単軸ロボットの中心より1cm、2cm、5cm、10cmの高さに固定して測定した。また、サーベイメータの時定数は、3s、10s、30sの各設定に対して測定を行った。サーベイメータの計測結果は、データロガーによりPCに記録された。また、実験後に記録された値より、バックグラウンドの数値を差し引いた値を測定値として解析を行った。

4. 結果および考察

GMサーベイメータでは20cmも模擬試料から離れていても計測可能であるのに対し、 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータでは、非常に検出の感度が悪かった。また、走査実験の結果、サーベイメータの時定数が大きければ大きいほど、測定値が小さくなり、走査速度が大きくなっても測定値が小さくなる事が分かった。

5. まとめ

^{223}Ra 薬剤による汚染の発見には、広口 GMサーベイメータ TGS-133は、模擬試料から20cmも離しても計測できる為有効であるのに対して、 NaI(Tl) サーベイメータ TCS-161は、 ^{223}Ra 薬剤の汚染箇所とのサーベイ距離、サーベイ速度、サーベイメータの時定数に十分留意しなければ計測が出来ない事が分かった。

6. 参考文献

[1] 厚生労働省 平成24年度人口動態統計
http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinko/kakutei12/dl/10_h6.pdf

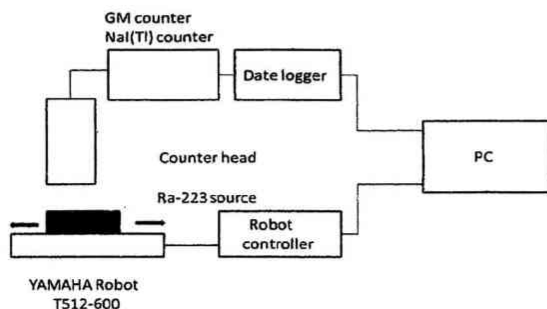


図1 実験装置概要

さつまいもとパセリによる土壤中放射性セシウムの吸収

09-1-036-0220 山口 祥英

(原子力研究所第三研究室)

1. はじめに

2011 年 3 月に福島第一原子力発電所事故によって、放射性物質が放出された。この結果、放射性セシウム (Cs) が土に付着し、土壤が汚染された。植物を用いて有害物質で汚染された土壤を元の状態に戻す方法をファイトレメディエーションという。本研究では、植物が除染に使用できるかを検討する。

2. さつまいもとパセリ

さつまいもとパセリは各 100g あたり 540mg、1000mg とカリウムを多く含む作物であるため、土壤からの吸収も多く Cs の吸収も期待される。一方で土壤中カリウム濃度が高いと Cs の吸収量が減るとの報告もある。本研究では、カリウム濃度の異なる 2 種の土壤を準備し、それぞれにさつまいもとパセリを植えて成長させ、Cs の吸収量を比較する。

3. 栽培方法

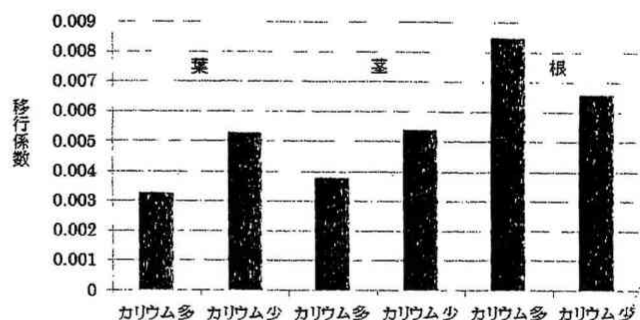
Cs を含む土を 1.2kg、園芸土を 1.8kg 混合して均一にし、1つのプランターに入れた。さつまいもとパセリをそれぞれ土壤中に含まれる「カリウム多」、「カリウム少」の2つの中で栽培した。また、土壤の Cs-137 濃度は $5500 \pm 200 \text{ Bq/kg}$ である。さつまいもは 6 月 10 日に苗を植え 11 月 12 日に収穫した。パセリは 6 月 10 日に種をまき 11 月 13 日と 12 月 11 日に各プランターから 5 株ずつ収穫した。

収穫したさつまいもを水洗いして葉、茎、根に分離した。葉は水洗いし、茎と根はそれぞれ 5cm の長さに切り、ブラシで土壤粒子を落とした。収穫したパセリは水洗いして茎、根に分離した。どちらも超音波洗浄機により 43kHz で 15 分間水洗いした。60℃ の乾燥機に 1 日入れ乾燥させた後、ミキサーで粉碎し U8 容器に入れて測定試料とした。ゲルマニウム半導体検出器で放射性 Cs の濃度を定量した。

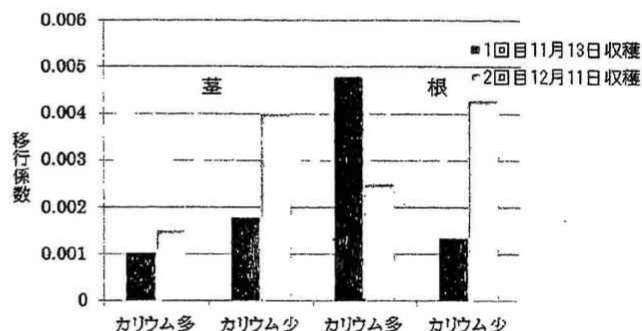
4. 結果および考察

収穫したさつまいもに含まれる Cs-137 の濃度は $20.8 \sim 203.8 \text{ Bq/kg}$ 、パセリでは $26.5 \sim 181.0 \text{ Bq/kg}$ で

あった。土壤中 Cs のさつまいも、パセリへの移行係数を第 1 図と第 2 図にそれぞれ示す。移行係数とは、その値が高いほど Cs が土から植物へ移行していることを示す。移行係数 = 農作物中の元素濃度 / 土壤中の元素濃度 で算出する。



第1図 さつまいもへのCs-137の移行係数



第2図 パセリへのCs-137の移行係数

さつまいもは葉、茎では「カリウム少」の方が Cs を多く吸収し、根では「カリウム多」の方が Cs を多く吸収した。パセリでは「カリウム少」で 2 回目に収穫したものの方が 1 回目よりも Cs 濃度が高かった。この結果から、カリウム少の土壤でかつ大きく成長させた方が Cs を多く吸収することがわかった。

5. おわりに

この研究から、カリウム少の土壤でかつ大きく成長させた方が Cs を多く含むことがわかった。しかし、土壤中放射性 Cs の植物への移行量が少ないことから、植物を用いた除染は容易ではないことが示唆された。

近畿大学原子炉上蓋内照射孔における中性子束の測定

10-1-036-0097 野平 陽巳

(原子力研究所第3研究室)

1. はじめに

近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) では、中性子束測定法として CsI や NaI の自己放射化を用いた新しい測定法の実験が行われている。その際、照射場として原子炉上蓋内照射孔が使われている。本研究では、従来からある中性子束測定法である金箔の放射化法[1]を用いて原子炉上蓋内照射孔の中性子束を測定することを目的とする。

2. 測定方法

金箔試料 (0.0241 g) を上蓋内照射孔に設置し、中性子の照射を行った。照射時間は 23520 秒とし、取り出し後 61020 秒後から測定を開始して、102049 秒間測定した。金箔試料から放出される Au-198 の γ 線 (0.411 MeV) を高純度 Ge 半導体検出器で測定した。検出効率は 2.39×10^{-3} とした。

中性子束 ϕ [$1/\text{cm}^2/\text{s}$] の照射場で照射された金箔中に生じる飽和放射能 A_∞ [$1/\text{s}$] は以下のように表される。

$$A_\infty = \phi \Sigma V \quad (1)$$

ここで Σ は金の放射化断面積 [$1/\text{cm}$] で、 V は金箔の体積 [cm^3] である。

3. 測定結果および考察

図 1 に高純度 Ge 半導体検出器によって測定した金箔試料の γ 線スペクトルを示す。光電ピークのカウンタ数は 1389.5 [counts] であった。測定結果から次の式を用いて飽和放射能を求めた。

$$A_\infty = \frac{\lambda C}{\epsilon(1-e^{-\lambda t_0})(e^{-\lambda t_1}-e^{-\lambda t_2})} \cdot \frac{1+0.042}{0.956} \quad (2)$$

ここで、 λ は崩壊定数 [$1/\text{s}$]、 ϵ は検出効率、 C

はカウンタ数、 t_0 は照射時間、 t_1 は照射終了から測定開始までの時間、 t_2 は照射終了から測定終了までの時間である。式 (1) (2) より、中性子束 ϕ は 3.31×10^4 [$1/\text{cm}^2/\text{s}$] となった。近畿大学原子炉では、黒鉛反射体上面での中性子束が 10^5 から 10^6 であり、中性子ラジオグラフィー用照射場での中性子束が 10^4 であるので、測定結果は妥当な値であるといえる。

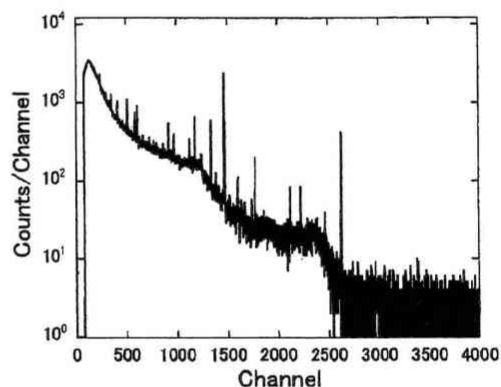


図 1 高純度 Ge 半導体検出器によって測定した Au-198 の γ 線スペクトル

4. まとめ

本研究では、近畿大学内上蓋内照射孔における中性子束を金の放射化法を用いて測定した。その結果、 3.31×10^4 [$1/\text{cm}^2/\text{s}$] という結果が得られた。

参考文献

- [1] 木村逸郎、阪井英次: "放射線計測ハンドブック", 日刊工業新聞社, pp. 765-767 (1991)

X線が細胞分化に及ぼす影響を評価するための基礎研究 -ヒト iPS 細胞を用いて-

10-1-033-0028 帖地 剛史

原子力研究所第三研究室

【目的】

放射線被ばくは、がんの発症リスクを高めることが知られている。がん以外の人体に与える影響としては、組織の発生や細胞分化に与える影響が懸念されている。細胞分化の研究を行うために、現在ではヒト iPS 細胞での研究が進められている。本研究ではヒト iPS 細胞に X 線を照射し、分化に対する影響を評価する。この研究の基盤を整えるため、原子力研究所に新しく導入された X 線照射装置の基礎データを取得し、ヒト iPS 細胞の培養及び照射した細胞を観察し形態や異常が見られないか評価する。

【方法】

1. 新 X 線照射装置と旧 X 線照射装置で比較を行う。線量の測定には TLD 素子 (UD-170L 蛍光体=BeO) を使用し、照射条件は新・旧ともに電圧 140kV、フィルター 1mm 厚、距離 400mm と同じ条件で設定する。電流のみ新 5mA、旧 4mA で照射する。①15 個の TLD 素子より感度が同等のものを旧 X 線照射装置にて 1Gy 照射して 5 個選出する。②照射線量を 0.1~20Gy とし、新・旧での比較を行う。また新 X 線照射装置での細胞実験を行うため、③照射野での線量分布を測定する。④TLD 素子をペトリ皿内に置いた場合の影響を評価する。
2. ヒト iPS 細胞の培養及び X 線照射による評価方法について：理化学研究所から供与されたヒト iPS 細胞の培養を行う。細胞を観察し、X 線照射した時の細胞を観察し形態や異常が見られないか評価する。

【結果・考察】

1. 15 個の TLD 素子から感度が同等なものを 5 個選出した。また新・旧 X 線照射装置の比較を行った結果照射において線量に差異がなく直線性が見られた (図 1 参照)。照射中央部から水平に 20cm 離れた場所での照射でも線量の差異は見られなかった。ペトリ皿も、線量に影響しなかった。
2. iPS 細胞の培養を行った結果、培養可能であることが分かった (図 2 参照)。また放射線に対する生存曲線を作成する場合は、細胞の集合体であるコロニーの形で継代していく必要がある。放射線感受性を別の指標から評価する必要があると考える。

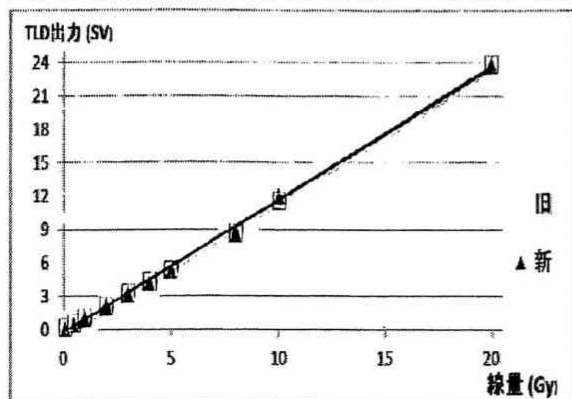


図 1 X線照射装置による線量の直線性

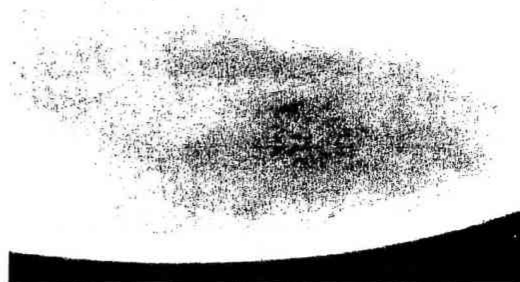


図 2 iPS細胞2継代4日目の写真

キノコへの放射性セシウムの移行

10-1-033-0052 吉村 忠

原子力研究所第 3 研究室

【目的】

キノコの菌糸は倒木や土壌中に張り巡らされ森林生態系での物質循環に大きな役割をはたしている。またキノコは植物に比べてセシウムやルビジウムの濃度が高いことが明らかとされている。そのことから、キノコが放射性セシウムを濃縮する作用を持っていると考えられている。これを利用してキノコによる土壌や枯葉に含まれる放射性セシウムの回収も期待されている。本研究ではキノコの種類による放射性セシウムの吸収の差異を比較する。

【方法】

5 種類のキノコ（ヒラタケ、ヒマラヤヒラタケ、ブナシメジ、エリンギ、マイタケ）について種菌を購入して培地に植え付けて栽培した。培地は基材にオガクズ、栄養材にフスマを用いて 2 対 1 に混合した。含水率は 65%とした。基材のオガクズの 10%wt、30%wt をそれぞれ放射性セシウムを含む落葉に置換して培地①、②を作成した。培地は 850cc のポリビン 8 割程度まで充てんした。各栽培条件で 3 反復としたので、ポリビンの数は $5 \times 3 \times 3 = 45$ 本となった。湿度は 85%以上、気温は 22℃前後として、栽培日数は全行程で約 4 ヶ月であった。培地に含まれる Cs-137 濃度は培地①で $2.87 \pm 0.06 \text{ Bq/g}$ 、培地②で $10.0 \pm 0.10 \text{ Bq/g}$ であった。収穫したキノコに含まれる放射性セシウム濃度をゲルマニウム半導体検出器を使用して測定した。

【結果・考察】

5 種類のキノコのうちで、ヒマラヤヒラタケとエリンギが順調に生育し収穫できた。ヒマラヤヒラタケに含まれる Cs-137 濃度は培地①で $3.05 \pm 0.10 \text{ Bq/g}$ 、培地②で $5.40 \pm 0.15 \text{ Bq/g}$ であった。エリンギは培地①で $2.07 \pm 0.04 \text{ Bq/g}$ 、培地②で $3.84 \pm 0.05 \text{ Bq/g}$ であった。

培地の放射性セシウムのキノコへの移行のしやすさを表す量として移行係数がある。移行係数はキノコの放射性セシウム濃度 (Bq/g) を培地の放射性セシウム濃度 (Bq/g) で割り算することで求める。培地①、培地②の Cs-137 の移行係数はそれぞれ 1.06 ± 0.04 、 0.54 ± 0.01 であった。エリンギに関しても同様に移行係数を求めたところ、培地①は 0.72 ± 0.01 、培地②は 0.38 ± 0.05 であり、ヒマラヤヒラタケの 0.7 倍程度であった。

次に培地毎の放射性セシウム回収率を求めた。ここでいう回収率は、収穫したキノコに含まれる Cs-137 量 (Bq) を培地に含まれる Cs-137 量 (Bq) で割り算したものである。ヒマラヤヒラタケの場合は培地①、培地②とも 2.4%であった。エリンギの場合は培地①、培地②とも 39%であった。キノコが吸収した放射性セシウム濃度はヒマラヤヒラタケの方が高かったが、一方で収穫量はエリンギの方が多いので、回収率においてエリンギの方が高い結果となった。本研究において、除染に用いるという観点から考えた場合、栽培の行いやすさと収穫量から、ヒマラヤヒラタケよりもエリンギの方が優位であると考えられる。

農作物の栄養吸収における K と Cs の拮抗

10-1-033-0110 吉田 太輔

原子力研究所第三研究室

[目的]

放射性セシウム(Cs)が含まれている土壌で育てた農作物を摂取することで内部被ばくを起こす可能性がある。本研究は土壌・溶液に K を添加することで植物への Cs 移行量の変化をみることを目的である。そこで本研究では栄養吸収における K と Cs の拮抗を調べるため、K 含有量が高い植物のうち、根菜類であるサツマイモ、葉菜類であるパセリを研究対象とした。また、水耕栽培における K 添加による Cs 移行量の変化をみるため、カイワレ大根を生育させた。水耕栽培では K 添加量の調整が容易であるという利点がある。

[方法]

土壌栽培：放射性 Cs が含まれる土壌と園芸土壌を 2 : 3 の割合で混合した。その土に定期的に KCl 溶液を添加することで、2 種の K 濃度の土壌とした。K 濃度の異なる土壌でさつまいもとパセリを栽培した。生育したさつまいもを収穫し、茎・葉・根の 3 つの部位にわけ、60℃ で 2 日間かけて乾燥させて測定試料とし、U-8 容器に詰めゲルマニウム半導体検出器で放射性 Cs の濃度を定量した。

水耕栽培：放射性 Cs を含む落葉から水に放射性 Cs を溶出させ、その水に KCl を添加して 0.19~9.0g/L の間で 8 段階の K 濃度とした。それぞれの水溶液でカイワレ大根を栽培した。生育したカイワレ大根を収穫し、乾燥させて測定試料とし、さつまいもと同様に放射性 Cs の濃度を定量した。

[結果・考察]

収穫したさつまいもとパセリの Cs-137 濃度はそれぞれ 1.2~2.5Bq/kg, 3.5~23.8Bq/kg であった。さつまいもの土壌栽培では K 添加量が 2 倍の時、葉と根で放射性 Cs 濃度が低くなったが、茎では同等であった。パセリにおいては K 添加量が 2 倍の時、どの部位においても放射性 Cs 濃度が低く K と Cs の拮抗が見られた。水耕栽培における水溶液からカイワレ大根への放射性 Cs の移行係数を図 1 に示す。移行係数とは植物の放射性 Cs 濃度(Bq/kg)を溶液

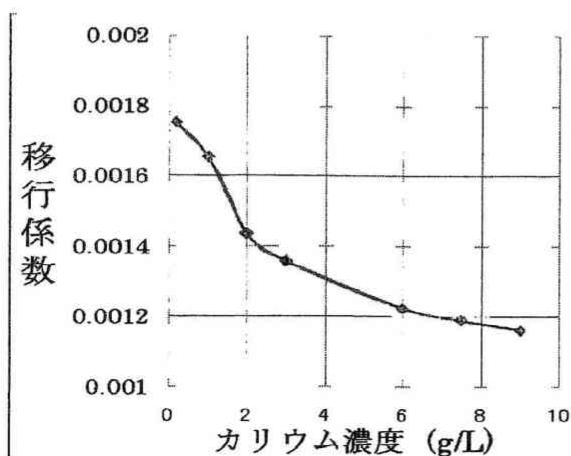


図 1 カリウム添加量と移行係数の関係

の放射性 Cs 濃度(Bq/kg) で割った値で算出され、係数が高いほど水にある放射性 Cs が植物に移行していることを意味する。K 濃度が高くなるにしたがって、収穫したカイワレ大根に含まれる Cs-137 濃度が小さくなる傾向にある。K 添加量が 1.0~2.0g/L と 7.5~9.0g/L を比べると Cs-137 濃度の変化量が大きく減少している。この研究から水耕栽培において K の添加量は放射性 Cs の移行に影響を与えるが、高濃度になると影響が小さくなることが分かった。

原爆放射線疫学データの対照群による低線量影響の再考

10-1-0-33-0115 切東 良介

原子力研究所第三研究室

【目的】 放射線影響研究所より入手できる「寿命調査 がん罹患率データ、1958-1998 年」のデータを用いて、従来の放影研の論文などで用いられてきた対照群を変更することによって、低線量域での固形がんの罹患率、過剰相対リスク、過剰絶対リスク、寄与リスクの変化、その差が有意な差であるか、従来の考えに沿うものか否かを調べることを目的とする。

【方法】 被曝線量と被曝時年齢に着目して分析した。対照群としては①～⑦(①：3km 以遠+3km 以内 5mSv,②：3km 以内 5mSv 以下,③：NIC,④：3km 以遠,⑤：NIC+ 3km 以内 5mSv 以下,⑥：NIC+ 3km 以遠,⑦：NIC+ 3km 以遠+3km 以内 5mSv 以下)が考えられる。なお NIC は not in city の略称であり、3km 以遠や以内というのは爆心地と被曝地点間の距離のことである。分析対象データを全ての固形がんとし、その excel データを線量別に分けた。さらに被曝時年齢別に分け、その上で到達年齢ごとに疾患罹患患者数と補正した観察人年を取り出し、罹患患者数を人年で割ることにより罹患率を算出した。この操作をそれぞれ被曝群と対照群に対して施した。その 2 つの罹患率 A,B から過剰相対リスク(A/B-1)、過剰絶対リスク(A-B)、寄与リスク(1-B/A)の 3 種類のリスクを計算により導いた。さらに誤差の伝播式を用いてそれらの誤差も計算し、グラフ上に誤差棒として示した。それらのデータを①～⑦の対照群毎に比較、あるいは対照群を一定にして被曝時年齢ごとの経年変化を比較した。

【結果・考察】 図 1 に、対照群⑦として被曝時年齢 5～15 歳の集団の到達年齢における過剰相対リスクの変化を被曝線量 5～500mSv と 500～1500mSv との比較で示す。図 1 から被曝線量 5～500mSv よりも 500～1500mSv の方が過剰相対リスクが大きいことが分かる。図 2 に、被曝時年齢 5～15 歳で被曝線量 5～500mSv の集団における過剰相対リスクの変化を、対照群①と⑦で比較して示す。図からは有意な差は見いだせなかった。以上より対照群の変更によるリスクの変化は限定的な範囲に止まると考えられる。

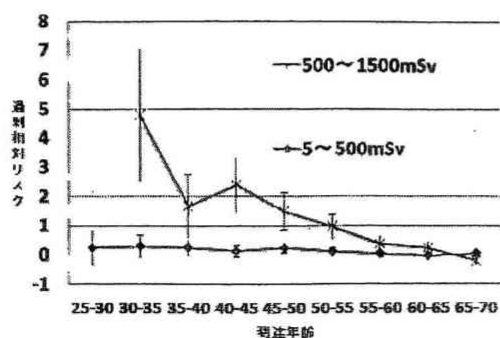


図 1：対照群⑦での線量別の過剰相対リスクの比較

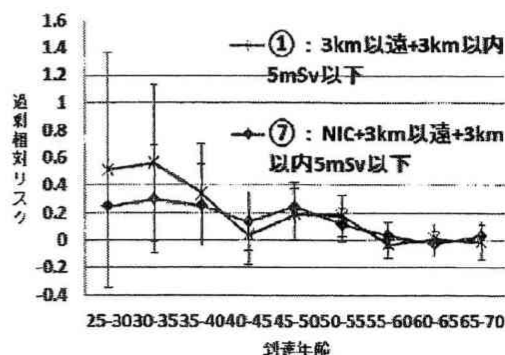


図 2：被曝線量 5～500mSv での対照群①と⑦の過剰相対リスクの比較

修 士 論 文

総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻

博士前期課程

有澤 公一

モンテカルロシミュレーションによる

Th-232 の即発中性子スペクトルの解析

河崎 将大

近畿大学原子炉における制御棒反応度価値曲線の検証

モンテカルロシミュレーションによる Th-232 の即発中性子スペクトルの解析

Analysis of Prompt Neutron Spectra of Th-232 by Monte Carlo Simulation

12-3-334-0404 有澤 公一 (原子核工学研究室)

1. 緒言

原子炉や加速器駆動未臨界炉など、核分裂連鎖反応を利用した施設を設計、稼働するには、様々な原子核データが必要となる。即発中性子スペクトル(PFNS)は重要な原子核データの一つであり、今でも理論計算精度の向上が望まれている。従来 PFNS の評価に用いられてきた Multimodal-Madland-Nix(MM-MN)モデル[1]をさらに改良するため、核分裂片加速途中における中性子放出(Neutron Emission During Acceleration, NEDA)を考慮する計算手法が当研究室で開発された[2]。本研究では、この手法を用いて、 ^{232}Th と、その壊変サイクルによって発生する ^{233}Pa について、PFNS 計算の精密化を試みた。

2. 計算手法

本研究では、NEDA の定量的評価のためモンテカルロシミュレーション(MCS)を用いて解析を行った。MCS は確率の伴う事象に乱数を用い、コンピューター内に仮想的な物理空間を形成することで、実験を模擬することができ、様々な物理量の相関関係を調べることができる。

2.1 MCS

MCS では、まず与えられた核分裂モード(ST1, ST2, SL)の確率分布及び乱数を用いることで核分裂片の初期条件を決定する。次に初期条件からの脱励起過程もまた核分裂片ごとに固有の確率分布及び乱数を用い、核の励起エネルギーが中性子放出の閾値以下となるまで中性子放出を行う。最後に残った励起エネルギーはガンマ線として放出される。この作業を多数回(本研究では10億回)行うことで様々なデータを蓄積する。

以上のMCS計算はS. Lemaireらの方法[3]とほぼ同等であるが、本研究では統計理論に

基づいて中性子放出の平均寿命を計算し、核分裂片の指数関数に従った壊変特性及び乱数を用いた中性子放出時間の計算も行った。計算された中性子放出時間は核分裂片のクーロン加速時間と対応させることで、最終的に中性子放出確率 $P(\chi)$ を、核分裂片の加速割合因子 $\chi (\chi = KE / KE_{final})$ の関数として求めることができる。

本研究では断裂時の軽・重分裂片への励起エネルギー分配として、等温仮定による分配を仮定し、MCS 結果への影響を検討する。

2.2 NEDA を考慮した PFNS

MM-MN モデルでは核分裂片が最終速度に達してからのみ中性子放出されると仮定している。NEDA を考慮した PFNS は、上で得られた $P(\chi)$ を用いることで、

$$\langle N(E) \rangle = \int_0^1 N(E, \chi E_f, T_m) P(\chi) d\chi, \quad (1)$$

として計算される。ここで、 $N(E, E_f, T_m)$ は MM-MN モデルを用いて計算される PFNS で、核分裂片の核子当たりの運動エネルギー E_f 及び最大核温度 T_m の関数である。計算された $\langle N(E) \rangle$ は各核分裂モード及び軽・重分裂片について個別の PFNS であるので、MM-MN モデルに従い、各モードの分岐比及び即発中性子数を重率として合成し全 PFNS を求めた。

3. 結果及び考察

MCS の計算結果例として、 $^{232}\text{Th}(n, f)$ の $P(\chi)$ に対する中性子の放出確率の相関を表すグラフを、図1に示す。図1より、大部分の中性子が最終速度近傍($\chi \approx 1$)で放出されているが、僅かではあるものの NEDA の効果を確認することができる。各核分裂モード及び軽・重分裂片によって $P(\chi)$ の形状は異なるが、これは計算された平均寿命が核分裂片の励起エネルギー、中性子結合エネルギー及び準位構造に大きく依存することによる。

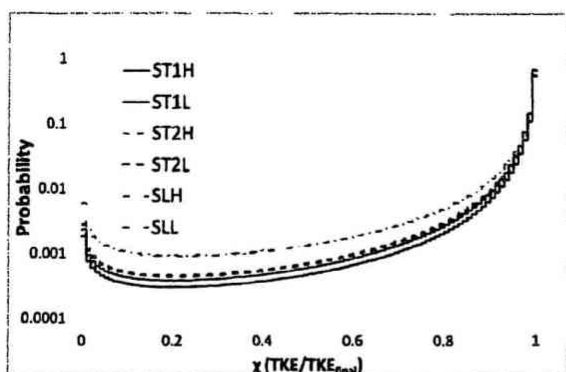


図 1 $^{232}\text{Th}(n, f)(3\text{MeV})$ の $P(\chi)$ に対する中性子の放出確率

Fig.1 Neutron emission probability as a function of χ

図 1 及び(1)式を用いて計算された $^{232}\text{Th}(n, f)$ の PFNS(3MeV, Maxwell 型 PFNS との比)を図 2 に示す。この図より、NEDA を考慮した PFNS は、NEDA を考慮しない場合に比べ、低エネルギー領域(<1MeV)において実験値との一致が改善されたことが分かる。また、本研究では 2MeV~8MeV の入射エネルギーにおいて PFNS 計算を行ったが、NEDA 効果の有無による PFNS の差は、相対比で見ると入射エネルギーの増加によってあまり変化しなかった。入射エネルギーが増加すると励起エネルギーや SL モードへの分岐確率が上昇し、NEDA の効果も多少増加する。しかし、スペクトル自身が高エネルギー側へシフトし、NEDA の効果を受けやすい低エネルギー領域の中性子が減少するため、大きな影響はなかったものだと考える。

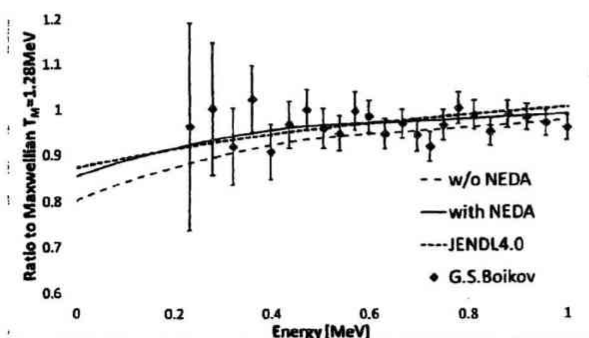


図 2 NEDA を考慮した PFNS $^{232}\text{Th}(n, f)(3\text{MeV})$

Fig.2 PFNS corrected for NEDA effect

図 3 に $^{233}\text{Pa}(n, f)$ の PFNS(2MeV, Maxwell 比)を示す。図 3 より、 ^{233}Pa についても ^{232}Th と同じく NEDA を考慮することで PFNS の低エネルギー領域が増強されていることが分かる。実験値がなく比較はできないが、実験値との一致が改善できた ^{232}Th と同じ傾向にあることから NEDA 効果の考慮は ^{233}Pa についても有効であると考えられる。

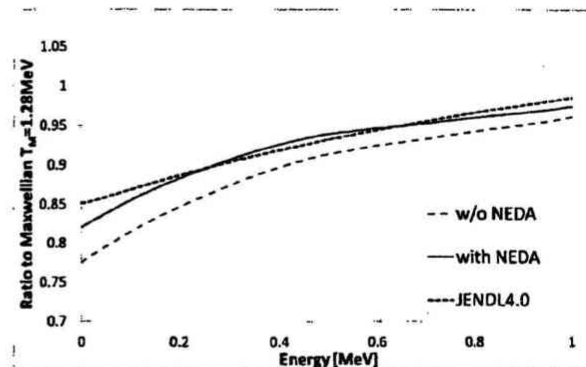


図 3 NEDA を考慮した PFNS $^{233}\text{Pa}(n, f)(2\text{MeV})$

Fig.3 PFNS corrected for NEDA effect

4. 結論

本研究では MCS を用いて NEDA の定量的評価を行い、従来の PFNS 計算モデルに取り入れることで PFNS 計算の精密化を試みた。 $^{232}\text{Th}(n, f)$ については、低エネルギー領域における実験値との一致を改善することができた。

また、NEDA 効果の影響は中性子の入射エネルギー、核種によってあまり大きく変化せず、どの場合においても NEDA 効果を考慮しない場合に比べて数%程度であることが分かった。

参考文献

- [1] T. Ohsawa *et al.*, Nucl. Phys. A653 (1999) 17.
- [2] A. Matsumoto *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 49 (2012) 782.
- [3] S. Lemaire *et al.*, Phys. Rev. C72 (2005) 024601

近畿大学原子炉における制御棒反応度価値曲線の検証 Verification of Control Rod Worth Curve in UTR-KINKI

12-3-334-0414 河崎 将大 (原子核工学研究室)

1. はじめに

制御棒反応度価値は、原子炉反応度への制御棒操作の効果を表す運転制御上重要な核特性値である。研究用原子炉では、この反応度価値は、正ペリオド法を用いて測定される場合が多い。制御棒を臨界位置から引き抜くと超臨界となり出力が指数関数的に上昇する。正ペリオド法は、この上昇率から引き抜き量に対する反応度価値を決定する。幾つかの制御棒引き抜き量について反応度価値が測定され、この測定結果を全ストロークに対する引き抜き割合の関数として整理したものを制御棒反応度価値曲線と呼ぶ。近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) では、任意の位置に設定できる制御棒は、反応度価値の大きなシム安全棒と価値の小さな調整棒の2系統しかない。残り2系統の安全棒は運転中、常に上限位置である。このため、シム安全棒の引き抜きを調整棒の挿入で補償できず、正ペリオド法によりシム安全棒の反応度価値曲線を全ストロークで作成することができない。本研究では、シム安全棒を臨界位置から連続挿入し、この時の出力減衰の測定からシム安全棒の位置に依存した反応度価値を連続的に求め、全ストロークの反応度価値曲線を作成する。データ解析には逆動特性法 (IKM) を採用する。また、モンテカルロ法による実験のシミュレーションを実施し、この計算結果からシム安全棒の反応度価値曲線を作成する。反応度価値曲線の実験結果と計算結果を比較検討する。

2. 実験および計算方法

まず、安全棒#1、#2、シム安全棒の3本の制御棒が上限位置、調整棒29%引き抜きで原子炉を臨界とした。次に、シム安全棒を連続挿入し、3本の中性子検出器信号の時系列データを収録した。これら3本の検出器として、原子炉上部の中央と南側に設置した2本のBF₃検出器と北側に設置した1本のFCを採用した。これらデータを逆動特性解析し、シム安全棒の反応度価値曲線を得た。実験のシミュレーションには、日本原子力研究所が開発した連続エネルギー中性子輸送モンテカルロコードMVP2.0を使用した。実験時と同様の炉心を計算機上に再現し、

シム安全棒を全ストロークの10%ごとに移動させ計算を行った。シミュレーションに使用した核データライブラリはJENDL-4.0である。また、他の核データライブラリを使用したシミュレーションも行い、ライブラリの差異による影響も検討した。さらに、計算結果の妥当性を確認するため、調整棒に対し正ペリオド法実験を行い計算値との比較を行った。調整棒に対する計算はシム安全棒を調整棒全挿入時の臨界位置である56%引き抜き位置に固定して行った。

3. 結果および考察

反応度価値曲線の計算に先立ち、余剰反応度、停止余裕、及び制御棒を臨界位置に設定した体系の反応度を計算した。この臨界体系の反応度計算結果への核データライブラリの影響を表1に示す。

表1 臨界体系の反応度
Table1. Reactivity of the critical position

Reactivity[%Δk/k]	
JENDL-4.0	-0.027±0.001
JENDL3.3	0.248±0.004
ENDF-B/MII	0.169±0.004
JEFF-3.1	0.097±0.002

実験値は臨界体系なので反応度が0である。JENDL-4.0で計算を行った場合が最も実験値に近い結果を示している。図1に正ペリオド法実験とモンテカルロ計算により作成した調整棒の反応度価値曲線を示す。

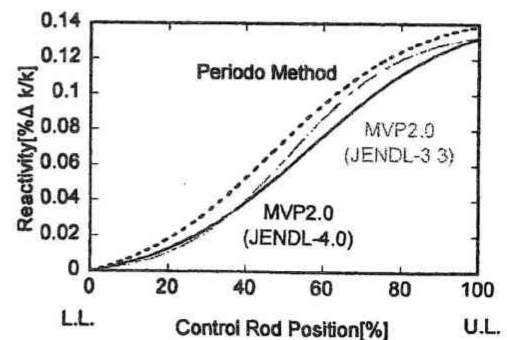


図1 調整棒の反応度価値曲線
Fig1 Rod worth curve of Regulating Rod

JENDL-4.0 を用いて計算した反応度価値の制御棒位置依存性は正ペリオド法の依存性と酷似している。JENDL-3.3 の結果については全ストロークの 80%以降で反応度価値の変化が小さくなる傾向を確認した。表 2 に各手法で求めた調整棒の積分反応度価値を示す。

表 2 調整棒の積分反応度価値
Table2 Rod worth of Regulating Rod

Reactivity[% $\Delta k/k$]	
Periodo Method	0.139 \pm 0.005
MVP2.0 JENDL-4.0	0.132 \pm 0.004
JENDL-3.3	0.132 \pm 0.007

調整棒の積分反応度価値の計算結果は実験値とよく一致した。JENDL-4.0 を用いた計算結果は、正ペリオド法実験の結果をよく再現した。逆動特性解析とモンテカルロ計算により作成したシム安全棒の反応度価値曲線を図 2 に示す。

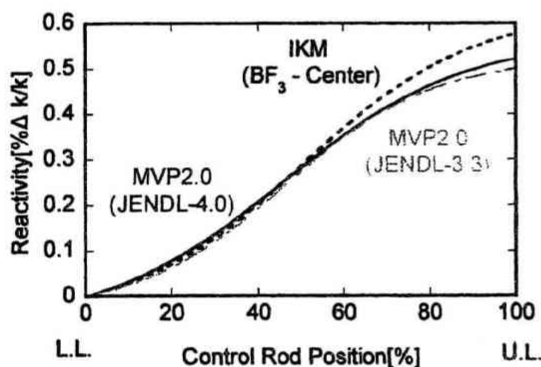


図 2 シム安全棒の反応度価値曲線
Fig2 Rod worth curve of Sim Safety Rod

両手法で作成した反応度価値曲線は、全ストロークの 60%まではよく一致した。シム安全棒が全ストロークの 50%の位置で、燃料とシム安全棒の上端位置が重なる。計算値はシム安全棒を 60%以上に設定した場合、実験値に対し反応度価値を過小評価する傾向を示した。今回行ったモンテカルロ計算では、燃料から離れた位置の中性子束を過小評価したため、反応度価値が実験値より小さく算出されたと考察する。JENDL-4.0 と JENDL-3.3 を用いた計算の結果はよく一致したが、調整棒に対する計算結果と同様に、JENDL-3.3 の結果は、全ストロークの 80%以降の反応度価値の変化が小さくなっている。

各手法により算出したシム安全棒の積分反応度価値を表 3 に示す。

表 3 シム安全棒の積分反応度価値
Table3. Rod worth of Sim Safety Rod

Reactivity[% $\Delta k/k$]	
IKM	0.577 \pm 0.022
Rod Drop Method	0.516 \pm 0.089
MVP2.0 JENDL-4.0	0.524 \pm 0.010
JENDL-3.3	0.499 \pm 0.009

逆動特性解析と落下法実験により測定した積分反応度価値は、誤差の範囲内で一致している。以上の結果より、逆動特性解析で作成した反応度価値曲線は妥当な結果であると考察する。

4. まとめ

調整棒における反応度価値曲線の計算結果は、正ペリオド法実験の結果によく一致した。シム安全棒における反応度価値曲線の実験値と計算値は全ストロークの 60%までよく一致した。しかし、60%以上になると計算結果は逆動特性解析の結果に対し、過小評価となった。今後の課題として、計算体系を見直し、より高い精度で実際の炉心を模擬し、再計算を行うことがあげられる。また、核データライブラリとしては、JENDL-4.0 が最も実際の体系を模擬していることを確認した。

参考文献

- [1] 長家 康展：粒子輸送モンテカルロ計算の基礎とそこに潜む不確かさ，第 38 回炉物理夏季セミナーテキスト
- [2] 長家 康展・奥村啓介・森 貴正・中川正幸：MVP/GMVP 第 2 版：連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード，日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

博 士 論 文

総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻

博士後期課程

左近 敦士

パワースペクトル解析による加速器駆動炉の

未臨界度監視手法開発に関する研究

博 士 論 文

総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻 博士後期課程

左近 敦史 パワースペクトル解析による加速器駆動炉の
未臨界度監視手法開発に関する研究

左近敦史氏は、平成 20 年 4 月に電気電子工学科の卒論研究学生として原子力研究所に配属された後、大学院在籍期間も含め 6 カ年にわたり近畿大学原子炉と京大臨界集合体等を使用した炉物理実験研究を推進してこられました。平成 26 年 1 月には、これら研究成果の集大成として博士学位論文をまとめられ、同年 3 月に近畿大学博士（工学）を授与されました。また、同月には日本原子力学会炉物理部会賞も受賞されております。原子力研究所配属院生としては谷中裕氏に続く二人目の学位取得者であり、今後の大学院後期課程進学者の道筋の開拓という観点から本研究所にとっても大変意義深い 6 カ年の足跡でした。左近氏は工業高校・工業高専出身ということもあり、彼から現場教育の大切さを教えられました。在学中は、自身の研究のみならず、前期課程の院生や卒論研究生等の後輩の指導にも尽力されました。平成 26 年 4 月には、日本原子力研究開発機構に入社され、現在は臨界安全実験装置 STACEY の設置変更業務と福島原発廃炉に関連する試験計画策定に従事されており、新進気鋭の研究者として今後の活躍が期待されております。以下に、博士論文の要旨を掲載し、その功績を称えたいと思います。

（指導教員 橋本憲吾 記）



フランス・ナントにて（中央）

博 士 論 文 要 旨

近畿大学大学院 総合理工学研究科後期課程

エレクトロニクス系工学専攻 原子核工学研究室 左近敦史

現在、加速器駆動未臨界炉(Accelerator-Driven System)の研究開発が世界各国で活発に進められている。ADS において炉心の未臨界度は、臨界安全性の裕度だけでなく加速器ビーム入力に対する炉出力の利得をも支配する。このため、ADS の運転においては炉心の未臨界度を常時監視する必要がある。しかし、現在まで用いられてきた未臨界度モニタリング手法は、ADS の駆動中性子源であるパルス中性子源を一切想定しておらず、ADS への適用は困難である。本論文は、ADS に対して適用可能な未臨界度モニタリング手法を新たに開発し、その適用性を実験的に検証することを目的とする。本論文は全 5 章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章(序論)では、本論文の研究の背景、課題、目的、及び論文構成について述べている。

第 2 章(D-T 中性子源駆動未臨界炉体系におけるパワースペクトル測定)では、臨界体系や定常中性子源下の未臨界体系で採用されてきた従来のパワースペクトル解析法を、パルス中性子源駆動下の ADS に対して適用できるようデータ解析式を理論的に導出し、この解析理論の妥当性を実験的に検証している。ADS 体系内に配置した中性子検出器信号の時系列データをパワースペクトル解析の対象とし、1 本の検出器信号の自己パワースペクトル密度と 2 本の検出器信号間の相互パワースペクトル密度を考える。パルス中性子源駆動未臨界炉体系である ADS への適用を可能とするために、周期的かつパルス状に中性子を供給する中性子源を考慮してこれら自己及び相互パワースペクトル密度を定式化し、この定式に基づくデータ解析手法を提案した。この解析手法の適用性の実験的検証として、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の固体減速架台と付設加速器を用いて構築した ADS 体系においてパワースペクトル測定実験を実施し、本解析

手法の妥当性を検討した。測定により得られた自己パワースペクトル密度、及び相互パワースペクトル密度には、原子炉雑音成分と呼ばれる連続した相関成分に加えて、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が確認できた。全ての自己パワースペクトル密度には検出器雑音と呼ばれる検出過程に基づく白色雑音成分が確認され、特に高周波数領域では相関成分の周波数特性に白色化が観察された。また、深い未臨界体系の相互パワースペクトル密度にも、相関成分の白色化が高周波数領域で観察された。この白色化は、高速フーリエ変換器の解析精度限界に起因するものであり、高精度の変換器を使用してもADSのような深い未臨界状態の相関成分の解析には限界があることを示している。自己及び相互パワースペクトル密度の相関成分データのみを抽出し、本解析式をこれらデータに最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。ただし、この相関成分の解析は、周波数全域が白色化する深い未臨界体系では実行不可能であった。一方、自己及び相互パワースペクトル密度の非相関ピーク点のみを抽出し、本解析式をこれらデータに最小自乗フィットすることによっても即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。非相関ピークの波高は相関成分に比べて二桁以上高いため、白色化の影響は無視できる。このため、深い未臨界体系に対しても解析を実施することができた。パルス中性子源固有の非相関ピークの存在が、非常に深い未臨界体系に対してもスペクトル解析を可能にしている。以上の結果から、パルス中性子源を考慮したパワースペクトル解析法の妥当性と深い未臨界に対する優れた適用性を確認できた。本パワースペクトル解析法は、フィットする理論式が一次遅れ系の簡単な関数型であることから、極めて複雑な理論式を採用するFeynman- α 法に比べて優位である。一方、安定的で強靱な未臨界度監視の観点からは、非線形最小自乗フィッティングの回避が望ましい。この実用上観点から、最小自乗フィットを用いない未臨界度監視手法の更なる開発が必要である。

第3章(D-T中性子源駆動未臨界炉体系における位相遅れ測定)では、前章でも述べたとおり、未臨界度監視手法に強靱な安定性を持たせるために、非線形最小自乗フィットを排した未臨界度解析手法を提案する。前章では、相互パワースペクトル密度を2本の検出器信号間で定義した。一方、本章では、加速器ビー

ム電流計信号と中性子検出器信号との間の相互パワースペクトル密度を考える。この複素数である相互パワースペクトル密度の位相の遅れから未臨界度を算出する手法を提案し、実験的検証を実施している。まず、この相互パワースペクトル密度の定式化により、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相から即発中性子減衰定数を算術的に得ることが可能であることを示し、非線形最小自乗フィットを要しない新たな解析手法を考案した。この解析手法の妥当性の実験的検証として、KUCA の固体減速架台と付設加速器を用いて構築した ADS 体系において、本研究で定義した相互パワースペクトル密度の位相測定実験を実施し、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相の解析から本手法の妥当性を検討した。一点炉動特性モデルに基づく本解析によって得られた即発中性子減衰定数は、非物理的な著しい周波数依存性が観察され、高周波数域では負の値となった。この周波数依存性は、パルス状の中性子集団が中性子源から炉心領域へ到達するのに要する時間遅れが原因であると考えた。そこで、この時間遅れを考慮して相互パワースペクトル密度の位相を定式化した。この理論式を採用してデータ解析をすることで、上記の非物理的な周波数依存性はほぼ消え、低周波数領域で得られた即発中性子減衰定数は前章の結果や他の実験値とも一致した。以上の位相データ解析において非線形最小自乗フィットは不要である。実際の加速器駆動未臨界炉における未臨界度の常時監視システムを構築する上で、最小自乗フィットの不要は、本位相解析手法の非常に有利な特徴である。

第4章(核破砕反応中性子源駆動体系におけるパワースペクトル測定)では、より実機に即した実験的検証として、核破砕中性子源を用いたパワースペクトル測定実験を実施している。第2章および第3章の実験は、D-T 反応に基づく 14MeV 中性子源を使用したものであった。本章では、実機と同様、高エネルギー陽子ビームによる核破砕中性子をパルス中性子源として使用している。固定磁場強収束型(FFAG)加速器からの高エネルギー陽子ビームを原子炉に導き、タンゲステンや鉛ビスマスの核破砕ターゲットをこの陽子ビームで照射した。この実験とデータ解析により、第2章で開発したパワースペクトル解析法の核破砕中性子源駆動下における妥当性を検討している。KUCA の固体減速架台と FFAG 加

速器を用いて構築した核破碎中性子源駆動の ADS 体系において、自己及び相互パワースペクトル密度の測定を実施し、これらパワースペクトル密度からの即発中性子減衰定数の決定を試みている。測定により得られた自己パワースペクトル密度及び相互パワースペクトル密度には、D-T 中性子源駆動体系による結果と同様、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が確認できた。これらピーク点に対して本解析式を最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数を得ることができた。一方、連続的な相関成分については、D-T 中性子源駆動体系と比較すると、高周波数領域における白色化がより顕著になった。このため、相関成分の解析は不可能であった。

第 6 章(結論)において、本論文のまとめを述べている。

以上の結果より、加速器駆動未臨界炉体系へ適用しうる新たなパワースペクトル解析手法の開発、非線形最小自乗フィットを不要とする画期的な位相ペクトル解析の提案、中性子源から炉心領域への中性子輸送に起因する時間遅れ効果の定式化など、加速器駆動未臨界炉に対する未臨界度モニタリング手法の高度化がなされた。更に、本研究で開発したパワースペクトル解析手法を核破碎中性子源駆動未臨界炉体系の実験へ適用し、より実機に近い条件において有効性の実証を行った。本研究のこれら成果は、今後の世界的な加速器駆動未臨界炉の開発において、炉心管理や運転管理技術の進展に資することが期待される。